

改良剂配合水分管理减少水稻吸收土壤中镉的研究

徐颖菲¹, 谢国雄², 章明奎¹

(1.浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2.杭州市植保土肥总站, 杭州 310020)

摘要: 为研究减少水稻籽粒中镉的积累, 选择一中度重金属污染农田, 进行了 4 种改良剂处理(不施改良剂、生物质炭、钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉(比例为 100 : 50 : 1)和石灰—沸石—硫磺粉(比例为 100 : 50 : 1))和 2 种水分管理模式(深灌和浅灌)的不同组合处理, 田间试验研究了改良剂配合水分管理减少水稻吸收土壤镉的效果, 改良剂用量为 3 t/hm²。结果表明, 施用改良剂和采取深灌均可显著减少水稻从土壤中吸收镉, 并以二者配合的效果最佳。与浅灌/不施改良剂处理比较, 钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 种复合改良剂配合深灌可分别降低籽粒中镉含量 56.53% 和 55.53%, 但施用生物质炭降低水稻吸收土壤中镉的效果相对较差。施用复合改良剂促使土壤中交换态镉转化为碳酸盐结合态、氧化物结合态及残余态镉等较为稳定的镉形态, 降低了土壤中生物有效态和水溶态镉, 减少了水稻吸收土壤镉; 深灌有利于硫化镉的形成, 并通过“稀释”作用降低水稻吸收土壤镉。研究认为改良剂配合深灌是一种较为方便、有效的技术, 适用于农田土壤镉污染的控制。

关键词: 复合改良剂; 深灌; 镉污染土壤; 水稻; 食品安全

中图分类号: S141.3; X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0356-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.050

Reduction of Cadmium Uptake of Rice Plant from Soil by Application of Amendments Combined with Water Management

XU Yingfei¹, XIE Guoxiong², ZHANG Mingkui¹

(1.College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University,

Hangzhou 310058; 2.Hangzhou Plant Protection and Soil-fertilizer Station, Hangzhou 310020)

Abstract: Reducing the accumulation of cadmium in the rice grain is the important target of heavy metal pollution control in China. In this study, a field experiment was conducted in a moderate heavy metal contaminated farmland to study the combined effects of applying amendments and water management on reduction of cadmium uptake of rice plant from soil. The field experiment included eight treatments, i.e., no amendment + shallow irrigation (control), biochar + shallow irrigation, calcium magnesium phosphate-palygorskite-sulfur powder (100 : 50 : 1) + shallow irrigation, limestone-zeolite-sulfur powder (100 : 50 : 1) + shallow irrigation, no amendment + deep irrigation, biochar + deep irrigation, calcium magnesium phosphate-palygorskite-sulfur powder + deep irrigation, and limestone-zeolite-sulfur powder + deep irrigation. Total dosage of all various amendments was 3 t/hm². The results showed that the uptake of cadmium by rice plant from soil was reduced significantly by the application of amendments and deep irrigation. Combined effects of both amendments and deep irrigation were greater than those of amendments or deep irrigation. Compared with the control, the contents of cadmium in the grain for treatments of calcium magnesium phosphate-palygorskite-sulfur powder + deep irrigation and limestone-zeolite-sulfur powder + deep irrigation were reduced by 56.53% and 55.53%, respectively. Effect of biochar on reducing the uptake of cadmium was relatively small. The application of the compound amendments could convert the exchangeable cadmium in the soil into relative stable form of cadmium such as carbonate bound, oxide bound and residual forms, and thus reduce the bioavailability of cadmium in soil and the uptake of cadmium from soil. Deep irrigation could enhance the soil reduction and the formation of cadmium sulfide, and achieved the purpose of reducing the uptake of cadmium from soil by dilution effect. The result suggested that application of amendments combined with deep irrigation was a

收稿日期: 2019-03-13

资助项目: 国家重点研发计划专项“农田地质高背景重金属污染机理研究”(2017YFD0800305); 杭州市科技发展计划项目“杭州市耕地重金属污染源解析及其减控的综合技术研究与应用”(20170432B23)

第一作者: 徐颖菲(1994—), 女, 浙江绍兴人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤环境质量研究。E-mail: 349975064@qq.com

通信作者: 章明奎(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤资源利用与环境效应研究。E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

convenient and effective technique to control cadmium uptake of rice plant from soil.

Keywords: compound amendments; deep irrigation; cadmium-contaminated soil; rice; food safety

镉是环境中毒性最强的重金属元素之一,具有生物迁移性强、极易被植物吸收和积累的特点,对动植物和人体均可产生毒害作用。自20世纪70年代中期起,我国陆续开展了土壤镉污染调查与防治工作^[1-3]。土壤镉主要通过食物链进入人体,并经过生物富集和生物放大作用,在人体内大量积累,对人体健康造成一系列损伤,镉对哺乳动物的致癌、致畸、致突变(“三致”)作用尤为强烈^[4-6]。1972年WHO将镉确定为优先研究的食品污染物,规定每周每人镉的最大摄入量不超过0.4~0.5 mg/kg,饮水中最大镉含量为5 μg/kg。稻谷对镉的富集作用明显强于玉米、大豆等其他的粮食作物,所以镉污染在水稻生产中表现得最为明显^[7-10]。近年来,我国多地报道了水稻作物受镉污染的问题,土壤镉污染问题已经严重威胁到我国食品安全^[11-13]。如何有效治理农田土壤镉污染、修复生态环境,是全社会高度关注的一个问题^[14-17]。近30年来,国内外已提出了客土法、化学淋洗法、电化学法,以及植物修复等镉污染土壤治理技术^[6,18-20]。化学修复法无法实现将重金属从土壤环境中移除,只是暂时降低其有效性,但其是现阶段较为实用的镉污染土壤的治理方法。植物修复法优点是花费低廉,较节省劳动力,但是植物修复耗时长,修复地点、环境条件十分受限,而且收割后积累在植物中的镉很难实现处理。目前,我国土壤镉污染现状依然不容乐观,现阶段普遍推行的土壤镉污染修复技术主要以单项技术为主,因地制宜地调整一些耕作管理制度,向土壤中添加改良剂降低镉生物有效性,减少镉从土壤向作物的转移,是目前较为综合且温和的治理途径^[21-22]。为此,本研究在前期研究工作的基础上,选择一中度重金属污染农田,进行了4种改良剂处理(不施改良剂、生物质炭、钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉(比例为100:50:1)和石灰—沸石—硫磺粉(比例为100:50:1))和2种水分管理模式(深灌和浅灌)的不同组合处理,通过田间试验研究了施用改良剂配合水分管理减少水稻从土壤中吸收镉的效果。

1 材料与方法

试验于2018年6—11月在浙江某中度污染的农田上进行。试验土壤类型为培泥砂田(属水稻土土类、渗育型水稻土亚类),其基本理化性状为:pH 5.48, Cd含量2.43 mg/kg,有机质含量26.65 g/kg,速效钾含量108 mg/kg,有效磷含量32 mg/kg,黏粒302 g/kg。试验设置8个处理,分别为4种改良剂处理(不施改良剂、生物质炭、钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉

(比例为100:50:1)和石灰—沸石—硫磺粉(比例为100:50:1))和2种水分管理模式(深灌和浅灌)的不同组合处理;除不施改良剂处理外,改良剂施用水平均为3 t/hm²。水分管理方法为:水稻移栽后,深灌处理返青期、分蘖期、拔节期、孕育期、灌浆期和黄熟期田面水层厚度分别控制在5~7,5~7.5~10,8~12,5~10,3~5 cm;浅灌处理返青期、分蘖期、拔节期、孕育期、灌浆期和黄熟期田面水层厚度分别控制在2~3,1~3,3~5,3~6,2~4,0~1 cm。石灰石粉、沸石、钙镁磷肥、坡缕石和生物质炭从市场购置,其Cd含量分别为0.15, 0.072, 0.31, 0.19, 0.22 mg/kg,符合农用要求。改良剂施用前均过100目(<0.149 mm)筛。

试验小区面积为10 m²,各处理重复3次。改良剂在翻耕前基施,每一小区施用改良剂后连续耕翻2遍。采用育苗移栽种植水稻,品种为“甬优1540”。移栽10天后,追肥化肥,N、P、K施用量各为75,20,15 kg/hm²,施用的化肥为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。分别于返青期、分蘖期、拔节期、孕育期、灌浆期和黄熟期采集小区田面水样,测定水溶性镉;同时观测土壤pH和Eh值;水稻成熟收获时(2018年11月),采集0—20 cm土样和水稻样品,每一混合土样由各小区内5个分样混合而成。土样经风干后分别过2, 0.15 mm塑料土筛,分析土壤性状和重金属形态。水稻各器官样依次用含少量洗洁精的自来水、自来水冲洗2~3次,去除附着的灰尘及其污染物质,之后继续用去离子水冲洗2~3次。清洗后的水稻各器官样切碎、混匀,分析重金属含量。土壤性状采用常规方法^[24]测定。水稻器官样经高氯酸消化后用石墨炉—原子吸收光谱法测定Cd含量。土壤水溶性Cd含量采用0.02 mol/L CaCl₂溶液提取:称取10 g土样于离心管中,加入50 mL 0.02 mol/L CaCl₂溶液,在室温下振荡2 h,离心后用0.45 μm滤膜过滤,滤液用于水溶性镉的测定。生物有效性镉采用EDTA提取:用2.5 g土在25 mL、pH为7的0.05 mol/L EDTA中提取1 h^[23]。土壤镉分级采用Amacher的程序^[24],共分为交换态、碳酸盐结合态、氧化物结合态、有机质结合态和残余态5种组分,顺次用0.01 mol/L Mg(NO₃)₂、1 mol/L NaOAc(pH 5)、0.2 mol/L 草酸铵+0.2 mol/L 草酸+0.1 mol/L 抗坏血酸(pH 3.3)和30% H₂O₂(pH 2.0)提取交换态、碳酸盐结合态、氧化物结合态、有机结合态镉。残余态镉含量用全量与以上4种可提取态总和的差值计算。以上消化液或提取液中的镉浓度采用石墨炉原子吸收法测

定。分析过程中采用标准物质进行质量控制,各重金属测试误差控制在 5% 以内;重复样间相对误差控制在 10% 以下。对部分经以上逐级分级方法的 4 种提取剂连续提取后的残土采用 $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$ 消解直接测定残余态镉的结果表明,其与差减法计算的残余态镉含量之间相对误差小于 12%,说明差减法计算的误差较小,符合要求。各组分镉的生物有效性为交换态>碳酸盐结合态>氧化物结合态、有机质结合态>残余态^[24]。

所有数据采用 Microsoft Excel 2003 软件处理,统计分析采用 SPSS 12.0 软件完成。差异性检验采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 改良剂和水分管理对土壤镉化学形态和田面水中镉的影响

由表 1 可知,不同处理之间土壤镉的化学形态组

成有所差别。以浅灌/不施改良剂处理作为对照,施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂后交换态镉比例明显降低,相应地碳酸盐结合态镉、氧化物结合态镉及残余态镉均呈现显著的增加,表明钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂可促进土壤交换态镉逐渐向较为稳定的镉形态转化。钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉的效果与石灰—沸石—硫磺粉较为相似,交换态镉的比例大约降低 7% 左右。施用生物质炭对土壤中镉化学形态的影响相对较小,比对照的交换态和氧化物结合态镉的比例略有减少,但残余态镉变化较小,而碳酸盐结合态和有机质结合态镉有所增加,其中有机质结合态镉的比例增加较为显著,表明生物质炭可使土壤中少量的交换态和氧化物结合态镉向有机结合态镉转化。灌溉深度对土壤中镉的化学形态影响不明显。

表 1 改良剂和水分管理对土壤中镉的化学形态组成的影响 单位:%

处理	交换态	碳酸盐结合态	氧化物结合态	有机质结合态	残余态
浅灌/不施改良剂	19.72±1.13a	7.65±0.53b	22.56±0.45b	18.42±0.76b	31.65±1.14b
浅灌/生物质炭	18.23±0.94a	8.23±0.61ab	21.65±1.04b	20.23±0.58a	31.66±1.21b
浅灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	12.04±0.89b	9.35±0.71a	24.65±0.89a	17.89±0.75b	36.07±1.31a
浅灌/石灰—沸石—硫磺粉	11.34±0.81b	9.27±0.68a	25.14±1.05a	18.65±0.73b	35.60±1.26a
深灌/不施改良剂	19.34±0.99a	7.86±0.54b	23.14±1.23ab	18.72±0.72b	30.94±1.08b
深灌/生物质炭	18.65±0.96a	8.33±0.66ab	21.05±1.25b	21.14±0.62a	30.83±1.22b
深灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	12.88±0.91b	9.14±0.74a	26.23±1.43a	17.69±0.61b	34.06±1.38a
深灌/石灰—沸石—硫磺粉	11.48±0.83b	9.43±0.71a	24.88±1.32a	18.24±0.53b	35.97±1.54a

注:表中数据为平均值±标准差;同列数字后不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

由表 2 可知,改良剂和水分管理可明显影响土壤性状。其中,钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉可增加土壤 pH 和 CEC,深灌及施用硫磺粉的处理降低了土壤 Eh 值。改良剂的施用也改变了土壤中水溶性镉和生物有效性镉的含量(表 3)。与对照比较,在浅水灌溉的条件下,施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂的土壤水溶性镉分别下降 38.43% 和 38.28%,生物有效态镉分别下降 55.54% 和 51.29%;施用生物质炭的土壤水溶性镉和生物有效态镉含量的下降量较小,分别比对照降低 7.71% 和 4.24%。在深水灌溉的条件下,施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂的土壤水溶性镉分别下降 59.68% 和 61.43%,生物有效态镉分别下降 55.90% 和 53.14%;施用生物质炭的土壤水溶性镉和生物有效态镉含量的下降较小,分别比对照降低 10.04% 和 5.35%。灌溉深度对土壤中生物有效态镉影响较小,但深灌明显降低了土壤中水溶性镉的含量。在施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂的情况下,深灌比浅灌的土壤水溶性镉含量分别下降 34.52% 和 37.50%。

表 2 改良剂和水分管理对土壤性状的影响

处理	pH	Eh/(mV)	CEC/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
浅灌/不施改良剂	5.53±0.05b	322±27a	9.65±0.19c
浅灌/生物质炭	5.61±0.06b	302±21a	9.89±0.20c
浅灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	5.98±0.07a	217±20de	10.56±0.24ab
浅灌/石灰—沸石—硫磺粉	6.08±0.09a	235±23cd	10.78±0.22a
深灌/不施改良剂	5.50±0.08b	278±24ab	9.53±0.23c
深灌/生物质炭	5.62±0.07b	266±23bc	9.95±0.21c
深灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	6.03±0.08a	178±25ef	10.45±0.19b
深灌/石灰—沸石—硫磺粉	6.12±0.11a	159±23f	10.69±0.21ab

表 4 结果还表明,不同水稻生育期深灌条件下田面水中镉浓度始终低于浅灌条件下。

2.2 不同改良剂和水分管理对水稻各器官中镉积累的影响

灌溉深度与施用改良剂对水稻各器官中镉的积累均有影响(表 5),以深灌结合施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉或石灰—沸石—硫磺粉等 2 类复合改良剂的效果为最佳,对地上部分的影响大于对地下部分的影响。与对照相比,在浅水灌溉的条件下,施用钙

镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂后,谷物中镉含量分别下降 43.72%和 40.95%,叶片中镉含量分别下降 31.88%和 36.58%,茎部中镉含量分别下降 39.40%和 37.01%,根部镉含量分别下降 26.19%和 24.33%;浅灌条件下施用生物质炭没有明显降低水稻各器官中镉的含量。在深水灌溉的条件下,施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰—沸石—硫磺粉 2 类复合改良剂后,谷物中镉含量分别下降 56.53%和 55.53%,叶片中镉含量分别下降 62.75%和 64.77%,茎部镉含量分别下降 57.31%和 61.79%,根部镉含量分别下降 28.27%和 27.01%。

表 4 不同生育期田面水中水溶性镉浓度

单位:μg/L

处理	返青期	分蘖期	拔节期	孕育期	灌浆期	黄熟期
浅灌/不施改良剂	15.32±1.62a	13.25±2.54ab	11.34±1.34ab	12.43±1.22a	13.68±1.02a	14.23±0.87a
浅灌/生物质炭	14.56±1.24a	15.32±1.82a	12.88±1.23a	11.35±1.14ab	13.02±1.11a	12.88±0.99a
浅灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	7.98±1.41c	8.34±1.67cd	8.98±1.05cd	10.14±1.13bc	8.57±0.87c	6.99±0.73c
浅灌/石灰—沸石—硫磺粉	9.58±1.42bc	6.98±1.02de	7.25±0.89d	8.15±1.22cd	6.98±0.61d	4.63±0.64d
深灌/不施改良剂	11.25±1.12b	9.87±1.59 cd	10.24±1.18bc	8.65±1.01c	10.35±1.02b	8.78±0.76b
深灌/生物质炭	9.79±1.43bc	10.12±2.14bc	8.79±1.13cd	8.69±1.14c	9.14±0.89bc	8.66±0.72b
深灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	6.98±1.84c	6.33±1.52de	7.25±0.91d	4.65±0.65e	5.17±0.54e	4.66±0.66d
深灌/石灰—沸石—硫磺粉	7.65±1.17c	5.69±1.13e	5.48±0.65e	6.23±0.96d	5.43±0.55e	3.65±0.58d

深灌也可在一定程度上降低水稻各器官中镉的含量,在不施用改良剂的情况下,深灌处理的谷物、叶片、茎部和根部镉含量分别比浅灌降低 10.30%,11.07%,9.25%和 1.86%。施用钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉时,深灌处理的谷物、叶片、茎和根部镉含量分别比浅灌降

表 3 改良剂和水分管理对土壤中水溶性和生物有效性镉含量的影响			单位:mg/kg
处理	水溶性镉	生物有效性镉	
浅灌/不施改良剂	0.0687±0.0031a	0.542±0.031a	
浅灌/生物质炭	0.0634±0.0027ab	0.519±0.029a	
浅灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	0.0423±0.0011c	0.241±0.016b	
浅灌/石灰—沸石—硫磺粉	0.0424±0.0013c	0.264±0.024b	
深灌/不施改良剂	0.0645±0.0024ab	0.558±0.032a	
深灌/生物质炭	0.0618±0.0019b	0.513±0.027a	
深灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	0.0277±0.0009d	0.239±0.019b	
深灌/石灰—沸石—硫磺粉	0.0265±0.0010d	0.254±0.022b	

低 22.77%,45.32%,29.56%和 3.35%。施用石灰—沸石—硫磺粉时,深灌处理的谷物、叶片、茎和根部镉含量分别比浅灌降低 24.68%,44.44%,39.34%和 3.54%。施用生物质炭时,深灌处理的谷物、叶片、茎和根部镉含量分别比浅灌降低 8.03%,6.83%,12.61%和 3.23%。

表 5 改良剂和水分管理对水稻收获物中镉含量的影响

单位:mg/kg

处理	根	茎	叶	谷物
浅灌/不施改良剂	0.485±0.015a	0.335±0.021a	0.298±0.017a	0.398±0.012a
浅灌/生物质炭	0.495±0.018a	0.341±0.027a	0.278±0.015a	0.386±0.011a
浅灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	0.358±0.013b	0.203±0.007c	0.203±0.005c	0.224±0.006c
浅灌/石灰—沸石—硫磺粉	0.367±0.017b	0.211±0.008c	0.189±0.008c	0.235±0.007c
深灌/不施改良剂	0.476±0.015a	0.304±0.024ab	0.265±0.007b	0.357±0.005b
深灌/生物质炭	0.479±0.018a	0.298±0.009b	0.259±0.006b	0.355±0.006b
深灌/钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉	0.346±0.016b	0.143±0.009d	0.111±0.004d	0.173±0.004d
深灌/石灰—沸石—硫磺粉	0.354±0.014b	0.128±0.011d	0.105±0.005d	0.177±0.005d

3 讨论

3.1 改良剂的作用

土壤中能被农作物利用的镉主要为有效态镉,因此,影响土壤中镉形态转变的因素都可影响农作物对土壤中镉的吸收。土壤 pH、矿物类型、氧化还原电位等都会影响土壤中镉化学形态的变化。酸性土壤中 Cd 的溶解性强,易在土壤中迁移。相反,碱性土壤中 Cd 不易溶解,危害程度明显减小。在淹水条件下,土壤环境 Eh 低,Cd 处于还原态,可形成硫化镉,后者难溶于水,Cd 的迁移性弱;而在非淹水条件下,土壤环境 Eh 高,易形成硫酸镉,后者镉易溶于水,Cd 的迁移性增强。本试验中所用的钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰石粉—沸石—硫磺粉为 2 种复合型改良剂,钙镁磷肥和石灰石粉呈碱性,施用后可明显增加土壤的 pH(表 2),降低土壤 Cd 的溶解度,从

而减少了水稻对土壤镉的吸收。坡缕石和沸石具有较高的阳离子交换量,其对土壤溶液中镉有较强的吸附作用,能降低土壤水溶性镉和田面水层中的镉浓度(表 3 和表 4),从而降低水稻镉的积累。硫磺粉在水田中可被还原为硫化物,后者与镉结合形成难溶于水的硫化镉,降低了土壤溶液中镉的浓度。因此,钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉和石灰石粉—沸石—硫磺粉 2 种复合型改良剂可通过与土壤镉的多方位作用,使土壤中镉由活性较高的交换态(包括水溶态)转化为活性较低的碳酸盐结合态镉、氧化物结合态镉及残余态镉,达到降低水稻从土壤中吸收镉的目的。据报道^[25-27],生物质炭能降低土壤中镉的生物有效性,但本研究的结果表明,当生物质炭用量为 3 t/hm²时,其提高土壤 pH 的作用较小,提高 CEC 的效果也不明显,因而其对降低水稻吸收镉的作用相对较小。究其原因可能是本试验中实

际应用的生物质炭远低于文献中报道的施用量,而生物质炭本身包含的石灰性物质相对较低,没有达到预期的目的。生物质炭中有机碳对镉吸附的作用力较弱,镉仍然可被水稻吸收利用。

3.2 深灌的效果

表 2 结果表明,深灌可降低土壤氧化还原电位,有利于硫化镉的形成^[28-30],因此深灌土壤水溶性镉比浅灌土壤低(表 3),相应地田面水中镉浓度也是深灌土壤比浅灌土壤低(表 4),从而降低水稻从土壤中吸收镉的数量;另外,深灌由于增加了田面水的体积,从而在一定程度上对水溶性镉起到了一个“稀释”作用。表 4 结果证明,深灌条件下水稻各生育期田面水中镉浓度始终低于浅灌。

4 结论

研究结果表明,钙镁磷肥—坡缕石—硫磺粉(比例为 100 : 50 : 1)和石灰—沸石—硫磺粉(比例为 100 : 50 : 1)配合深灌可有效降低水稻从土壤中吸收镉,分别比浅灌/不施改良剂处理降低谷物中镉含量 56.53%和 55.53%。施用复合改良剂主要通过把土壤中交换态镉转化为碳酸盐结合态、氧化物结合态及残余态镉等较为稳定的镉形态,降低土壤中生物有效态和水溶态镉达到减少水稻从土壤中吸收镉的目的;深灌可增强土壤的还原作用,有利于硫化镉的形成,并通过“稀释”作用达到降低水稻从土壤中吸收镉的目的。研究认为,改良剂配合深灌是一种较为方便、有效的技术,适用于大田土壤镉污染控制。

参考文献:

[1] 张海珍,张坤,阎爱博,等.农产品中重金属污染现状及防治对策[J].现代化农业,2014(9):37-38.

[2] 王兴利,王晨野,吴晓晨,等.重金属污染土壤修复技术研究进展[J].化学与生物工程,2019,36(2):1-7,11.

[3] 冯昕悦,王红,王昱璇,等.土壤重金属污染修复研究进展[J].化工管理,2018(31):83-85.

[4] 李继强,陈锡永,唐意佳,等.环境镉污染及其对人群健康影响的研究[J].中国公共卫生,2001,17(3):196-198.

[5] 沈珺珺,林亲录,罗非君.防治大米镉污染的生物及农作技术研究进展[J].食品与机械,2018,34(12):172-175.

[6] 孙丽娟,秦秦,宋科,等.镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J].生态环境学报,2018,27(07):1377-1386.

[7] 姜国辉,周雪梅,李玉清,等.不同浓度镉水灌溉对土壤及水稻品质的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):264-267.

[8] 陈彩艳,唐文帮.筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J].农业现代化研究,2018,39(6):1044-1051.

[9] 敖明,柴冠群,刘桂华,等.水稻对镉的吸收与转运规律研究进展[J].南方农业,2018,12(24):127-128,131.

[10] 刘利成,刘三雄,黎用朝,等.水稻镉积累与调控研究进

展[J].中国农学通报,2016,32(24):1-5.

[11] 刘吉振,李燕,张谊模,等.蔬菜重金属污染的叶面控制技术研究进展[J].江苏农业科学,2009(5):279-280.

[12] 谢晓梅,方至萍,廖敏,等.低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J].环境科学,2018,39(9):4348-4358.

[13] 郑海燕,郑圣发,程奕莲.土壤镉积累农田水稻安全种植区判别技术[J].北京农业,2014(6):108.

[14] 韦朝阳,陈同斌.重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J].生态学报,2001,21(7):1196-1203.

[15] 刘红梅,杨凯,肖正午.土壤镉污染治理及外源调控研究进展[J].作物研究,2018,32(5):449-453.

[16] 陈东哲,苏美兰,李艳,等.镉污染“VIP 技术”修复治理措施示范研究[J].湖南农业科学,2016(9):33-35.

[17] 李婧,周艳文,陈森,等.我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J].安徽农学通报,2015,21(24):104-107.

[18] 易江,甘平洋,陈渠玲,等.稻米镉污染及其消减技术研究进展[J].湖南农业科学,2018(3):110-113.

[19] 崔俊义,马友华,王陈丝丝,等.农田土壤镉污染原位钝化修复技术的研究进展[J].中国农学通报,2017,33(30):79-83.

[20] 柯国洲,彭书平,徐涛,等.土壤重金属镉修复技术研究进展[J].广州化工,2017,45(14):28-31.

[21] 徐应星,李军.硅和磷配合施入对镉污染土壤的修复改良[J].生态环境学报,2010,19(2):340-343.

[22] 王世华,罗群胜,刘传平,等.叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J].生态环境学报,2007,16(3):875-878.

[23] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978.

[24] Spark D L. Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods[M].Madison: SSSA and ASA,1996:703-919.

[25] 隋凤凤,王静波,吴昊,等.生物质炭钝化农田土壤镉的若干研究进展[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1468-1474.

[26] 左静,陈德,郭虎,等.小麦秸秆生物质炭对旱地土壤铅镉有效性及小麦、玉米吸收的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(6):1133-1140.

[27] 杨亚鸽,崔立强,严金龙,等.镉污染土壤生物质炭修复的化学稳定机制[J].安徽农业科学,2013,41(5):2044-2046,2057.

[28] 刘昭兵,纪雄辉,彭华,等.水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理[J].应用生态学报,2010,21(4):908-914.

[29] 张艳超,任艳芳,林肖,等.不同灌溉方式对镉污染下水稻生长和产量的影响[J].江苏农业科学,2017,45(2):51-54.

[30] 苏雨婷,赵英杰,谷子寒,等.灌溉方式对土壤有效镉含量与双季稻产量形成及镉累积分配的影响[J].作物研究,2018,32(3):180-187.